

周囲環境に適応するロバストなロボット移動技術

Robust Movement Control Adaptive to Surrounding Environment on Autonomous Robot

園浦 隆史

十倉 征司

田崎 豪

■ SONOURA Takafumi

■ TOKURA Seiji

■ TASAKI Tsuyoshi

少子高齢化が進むなか、人の作業を補助、代行するサービスロボットが期待されている。しかし、人が活動する環境には常に変化が伴うため、ロボットにとっては非常に移動の難しい環境といえる。その一方で、人と共存する環境では、ロボットにつごう良く環境を作り込むことは難しく、ロボット自身が環境の変化に適応しながら目的地まで安定して到達できることが望ましい。

そこで、軌道変更が随時可能な経路生成手法や、反射的な動作ルールに基づいた衝突回避手法、更に、カメラ画像情報を利用した自己位置推定手法を新たに開発した。これらの手法が、人と共存する環境の特徴を持たせた実験環境下でも安定して機能することを確認し、ロボットが人と共存する環境で活動するための基本技術を確立した。

In the aging society with fewer children, it is anticipated that robots will play the role of supporting people and acting on their behalf. It is not easy, however, for robots to move around in the constantly changing human living environment. In environments where they coexist with people, robots are expected to be able to reach their destination by adapting to variations in the environment without the need to make any adjustment to the surroundings.

Toshiba has developed a route-generating method that enables a robot to occasionally modify its trajectory, a collision-avoidance method based on a reflex movement rule, and a self-localization method utilizing camera image processing. Stable movement of a robot has been confirmed under an experimental environment resembling the situation of coexisting with people.

1 まえがき

少子高齢化が進み、労働力の減少が心配されるなか、荷物運搬や案内、掃除、警備など、人の作業を補助、代行するサービスロボットの活用が期待されている。特に、人を支援する作業には、移動能力を必要とするものが数多く存在する。これまでも東芝では、幼児及び高齢者の見守りや荷物運搬を目的に、ステレオカメラ画像を用いて特定の人に追従する“お供ロボット”を開発してきた⁽¹⁾。

人とかわかって支援しようとする、その活動エリアもおのずと人と同じエリアにする必要が生じ、人との距離もより近接したものとなる。このため、人と共存する環境（以下、人共存環境と言う）での活動を目的としたロボットを実現するには、工場用のロボットに比べて高度な移動技術が必要となる。

工場であれば、例えば移動経路上に誘導用のテープを敷くことや、認識用にマーカやタグなどの目印を取り付けることが容易に行える。更に、それらを目立たせるために周囲の色や模様、照明条件を指定するなど、環境側の構造を細かく規定することが可能である。また、そこで活動する人に対しても同様で、ロボット通行エリアへの立入りを禁止するなど、人の行動を規制することでロボットの動作を確保することが現実的な施策として受け入れられやすい。

しかし、人が生活する空間など人に対する優先度が高い共

存環境では、ロボットのための環境変更の自由度は一般に低く、ロボットにも高度な環境適応能力が求められる。

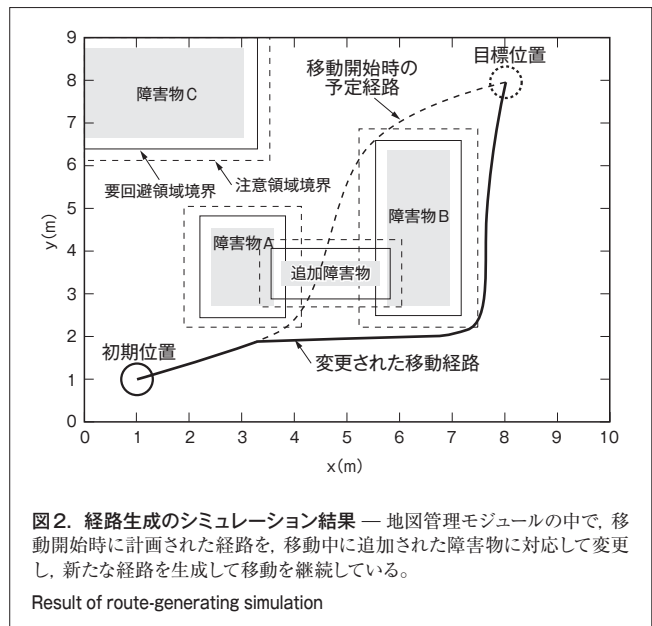
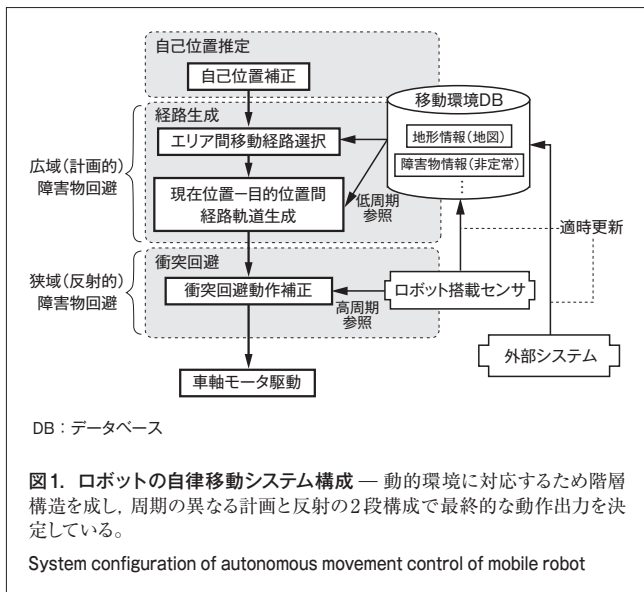
ここでは、当社が研究・開発を進めている、人共存環境で活動できるロボットに必要な移動技術について述べる。

2 人を支援するロボットの移動システム構成

時々刻々と状態が変化する人共存環境で、その変化に適応して安定した動作を実現するためには、図1に示すような階層構造型の移動システムが有効であると考えている。これは、広域的（計画的）動作と狭域的（反射的）動作を組み合わせた、ハイブリッドな移動処理構造を特徴としている。

計画的な経路生成部では、自己位置とロボット内外から収集された外界情報をもとに、最適な移動経路を導出し、必要に応じて随時軌道を変更する。一方、短期的な視点に基づく反射的な衝突回避部では、計画時に考慮できない細かな誤差や未知の障害物に対応して、目的経路に沿うような軌道補正を高速な周期で常時行う。このように、ロバストな移動動作の実現には、移動システムの中でも経路生成と衝突回避が重要な役割を果たす。また、これらを有効に機能させるためには、自己位置の推定が重要となる。

以下、この三つの技術に対する取組みについて述べる。



3 随時軌道変更可能な経路生成技術

3.1 人共存環境における経路生成の課題

人共存環境に代表されるような動的な環境では、考慮すべき障害物の数や位置が変化する。そのため、過去のある時刻における障害物の位置情報など、あらかじめ与えられた情報に基づいて経路を生成しても、予定した経路上に実際には進むことができないおそれがある。そのため、障害物の位置を常に把握し、移動中であっても生成した経路を随時変更する必要がある。しかし、従来のロボットにはこのような状態把握や軌道変更能力が十分に備わっておらず、工場内のロボットのように、外乱がほとんど加わらない理想的な環境下での移動を想定していることが多い。

更に、ロボットでは、様々な処理を限られた計算資源内で同時平行的に処理する必要があり、計算負荷を減らすことも重要となる。経路生成には、例えばポテンシャル法が多くの研究で従来から用いられてきた⁽²⁾。しかし、ポテンシャル法では、障害物の数と計算面積に応じて計算量が増加する問題があった。

3.2 動的環境の把握と低コストな経路生成

ロボットはセンサ配置のつごう上、物陰や遠方の環境変化を事前にすべて把握することはできない。動的な環境を移動する場合、できるだけ多くの情報源を用いることが重要になる。そのために、絶対座標で管理される地図管理モジュールを用意し、外部モジュールからの障害物情報を登録、修正できるようにした。これにより、複数のセンサデータに基づいた障害物情報の把握や、ネットワークなどを介した別システムの情報を反映できる。更に、地図管理モジュール中にロボットの現在座標や予定経路なども登録することで、更新される障害物と予定された経路との干渉などを、動作中に実時間で監視できるようにした。

また、障害物ごとに、ロボットの大きさなどを考慮に入れた要回避領域と注意領域を設定し、経路算出の際には注意領域の外周形状を利用するなど、処理を高速化した。これにより、各障害物に対して行われる回避対象の判断など、経路生成に要する計算負荷を大きく軽減し、現実的な計算時間を確保している。

3.3 環境変化に応じた実時間での経路変更

一例として、生成経路を実時間で変更したシミュレーション実験の結果を図2に示す。実験には、ロボットに実装される移動システムのうち、経路生成部だけを使用している。障害物A～Cを事前に登録した仮想環境で移動経路を生成した後、任意のタイミングで経路上に仮想的な障害物を追加登録している。図中のロボット位置は各時刻に出力される指令値(移動目標位置)である。

まず、初期位置である座標(1,1)から目標位置(8,8)までの移動を指示すると、破線で示す経路が生成される。次に、生成経路に沿うような移動指令値が各時刻に出力されるなか、新規障害物を図に示す位置に追加した。このときシステムは、新たに登録された障害物を避けた経路を算出するとともに、実行中の動作を中断し破棄して新たな経路に差し替え、図の実線で示す新たな経路に従う指令値をその後出力して、ロボットを目標位置まで到達させた。

このように、行動開始時には知りえない情報に対しても、移動中に経路を随時変更して対応できるようにした。

4 反射的動作による衝突回避技術

4.1 経路計画による移動の限界

移動ロボットは、自己位置の誤差や物体のわずかな配置ずれがあるだけで、計画経路どおりに移動を続けても壁や物な

どと接触してしまうおそれがある。また、人が物を出し入れするたびにその置き場所は変化し、そのエリアに存在する人自体も地図上にはない予期せぬ障害物となる。理想的な地図だけを頼りに移動するロボットにとっては、このような障害物に対応することは難しい。人共存環境での活動を目指すロボットでは、このような外乱が存在することを許容しながら移動できる技術が重要となる。

4.2 様々な外乱に適応可能な反射的動作

計画的動作が、ある程度の時間をかけて情報を蓄積した地図ベースで行われるのに対し、反射的動作では、その瞬間若しくは時間的にごく近傍のセンサ情報だけを用いた、ロボットとその周囲との相対的位置関係に基づいて動作決定がなされる。距離的にも時間的にも近傍の情報だけを使用するため、計画動作のような高度な経路生成は難しい反面、サーボループの制御周期レベル(1~数ms)で高速に監視し補正できるため、外界の予期せぬ変化などには高い適応性がある。

反射的動作のルールは、一般にはロボットから周囲の障害物までの相対的な距離と方位に基づき定められる。距離が近くなるほど移動速度を制限し、障害物とロボットの位置関係に応じて転換方向を定めることで回避動作を実現させるのが、従来の基本的な手法である。しかし、単純な動作ルールに基づくため、様々な状況に対応することが難しく、汎用性に問題があるものが多かった。また、従来手法では、行動にむだが多くごちない動きになりがちであった。

そこで、ロボットの進行方向との相対方位に応じて距離値が変化し、異方特性を持った疑似的な距離成分を定義し、これを媒介として回避姿勢と速度制限が導出できる反射モデ

ルを開発した。これにより、一つの動作ルールで様々な障害物に対応した、滑らかな回避動作を実現している。

4.3 反射的な衝突回避動作による障害物回避

前記の手法を実装したロボットの動作実験の結果を以下に示す。実験に使用した移動検証用ロボットは、独立二輪駆動方式の車輪型移動ロボットで、足回りに120°間隔で取り付けられた3台のレーザレンジファインダを用いて、360°全方位の障害物までの距離を計測できるようになっている。実験では、ロボットには速度50 cm/sで4 mの直進命令を出すだけで、障害物の事前情報はいっさい与えていない。このときロボットは、図3で示すように、移動途中から反射的に回避動作を行い、回避終了後には元の目標軌道に復帰して目的地へ到達できている。このときの軌道を図4(a)に示す。このロボットの胴

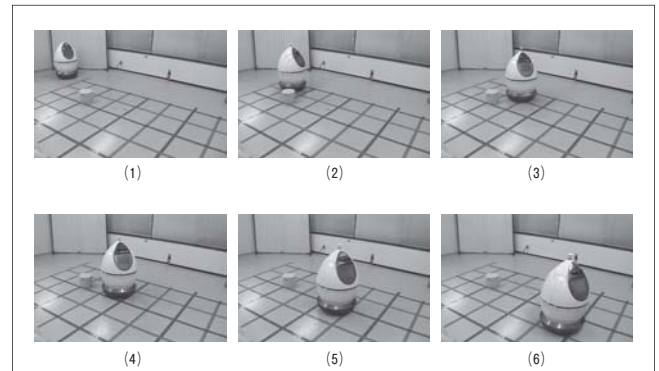
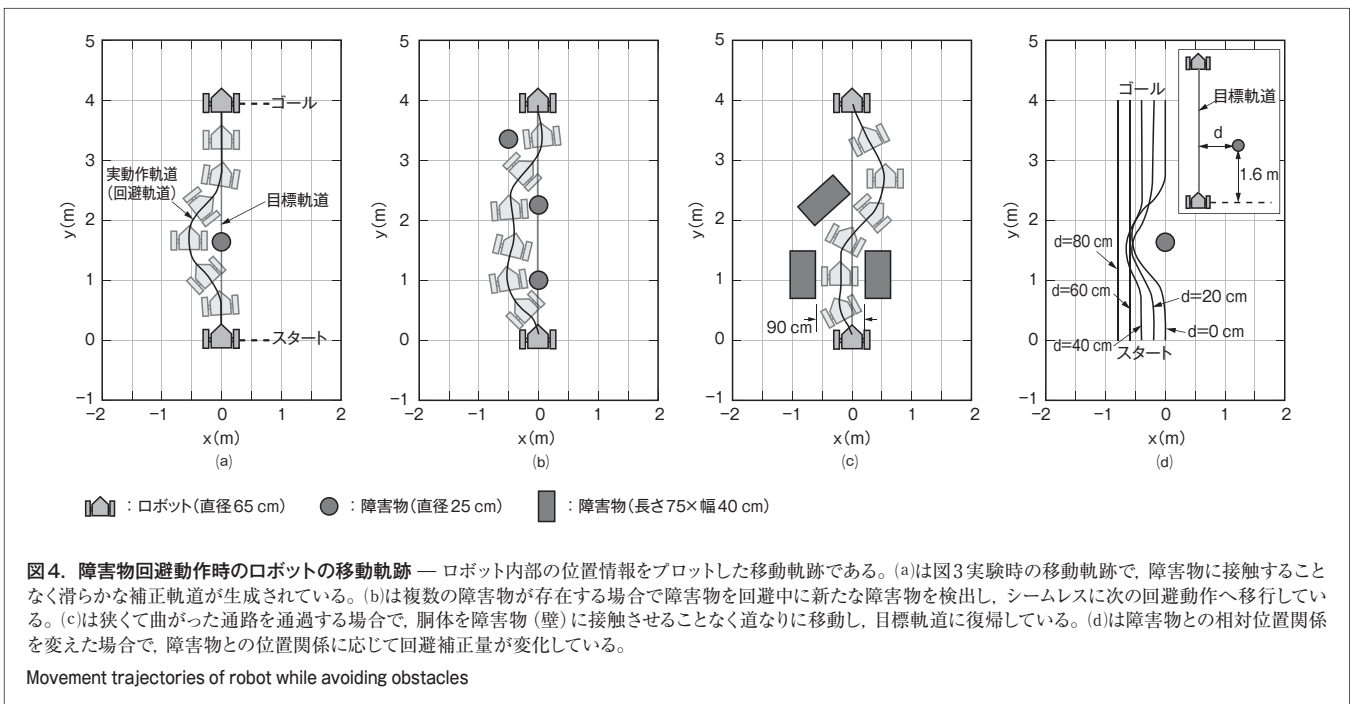


図3. 障害物回避の実験結果 — ロボットは、経路上にある未知の障害物に対して反射的に動作を補正し、衝突することなく移動を継続している。
Result of obstacle-avoidance experiment



径は65 cm, 障害物の直径は25 cmであり, これらが接触しないような軌道補正がなされている。

また, 障害物が複数存在する場合や狭くて曲がった通路の場合も, 図4(b), (c)のように, 同様の回避補正が機能し, これらに接触することなく目的の移動が達成できている。障害物突入位置を横にずらした場合, 図4(d)に示すように, 障害物から遠ざかるほど回避補正量も小さくなっていることがわかる。

このように, 反射的動作が状況に応じて常時機能することで, 未知の障害物など予期せぬ様々な外乱に対して, 滑らかに衝突を回避できる移動システムを実現した。

5 周囲の風景を利用した自己位置推定技術

5.1 全方位カメラ画像を用いた自己位置推定

経路生成の軌道を理想的なものに近づけ, 内在する誤差も反射的動作で対応できる範囲に収めるためには, ロボット自身の位置を常に正確に把握することが重要である。自己位置を推定する手法の一つに, 全方位カメラ⁽³⁾を用いた手法がある。レーザ計測による距離情報を利用した地形マッチング手法などと比べ, 精度では劣るものの, 全周囲にわたる2次元情報を使用するので情報量が多く, 物体配置などの環境変動の影響を受けにくくすることができる。

一般に, 全方位カメラを用いた自己位置推定では, ロボットの移動時に撮像される周囲の風景は回転変化やスケール変化が激しいため, SIFT⁽⁴⁾やSURF⁽⁵⁾などの特徴点抽出手法により得られる回転スケール不変特徴点(以下, LIF(Local Invariant Feature)特徴点と呼ぶ)及びLIF特徴量を用いて, 位置推定のための目印を表現している。LIF特徴点は, ゆがんだ全方位カメラ画像を用いた場合でも目印としてロバストに働く。しかし, 計算コストが高く, ほかのモジュールと同期しながらの実時間での自己位置推定が難しいという欠点もある。

そこで, 全方位カメラを用いたトラッキング可能なLIF特徴点を新たに定義して, 高速な自己位置推定手法を開発した。

5.2 トラッキング可能なLIF特徴点を用いた自己位置推定

LIF特徴点の検出と特徴量の比較にかかる計算時間を軽減するため, ゆがんだ画像中でも高速に処理できるトラッキング手法に着目した。一般にLIF特徴点がすべてトラッキングに適しているわけではない。そこで, 回転スケール変化にも強く, トラッキングも可能な点を目印 a として用いる。ここで目印 a は, 式(1)を長期的に連続して満たすLIF特徴点として定義している。

$$\begin{aligned} |F_A^{(t)} - F_a^{(0)}| < T_F \\ |x_A^{(t)} - x_a^{(0)}| < T_x \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)において, a' は点 a をトラッキングして得られた点, A は

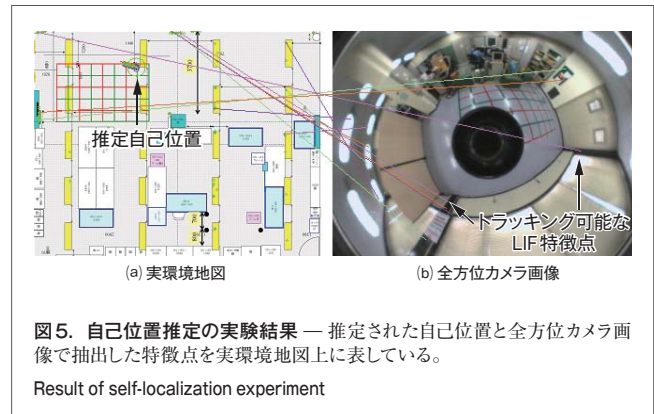


図5. 自己位置推定の実験結果 — 推定された自己位置と全方位カメラ画像で抽出した特徴点を実環境地図上に表している。

Result of self-localization experiment

時刻 t のあるLIF特徴点を表す。また, $F_k^{(t)}, x_k^{(t)}$ は, それぞれ点 k の時刻 t におけるLIF特徴量と位置を表し, T_F, T_x はしきい値である。

式(1)を基に検出した目印と実際の地図位置との対応をとり, 自己位置を推定したようすを図5に示す。

5.3 実環境移動時の自己位置推定結果

トラッキングを用いる開発手法の性能を確認するため, 自己位置の推定精度と計算時間について, 常にSURFだけで自己位置を推定する従来手法と比較した。10×10 mの部屋内で, QVGA (320×240画素)画像を用い, 開発手法と従来手法それぞれで自己位置を推定した結果を図6に示す。ロボットは正解データと記されている直線上を移動している。

開発手法の推定位置は, 正解位置からの平均ずれが0.38 m, 計算時間は画像1枚当たり16.4 msで, 従来手法に比べ位置誤差が76.4%減少し, 計算速度が2.9倍になった。また, 自己位置の推定による位置補正を行わずに移動させると,

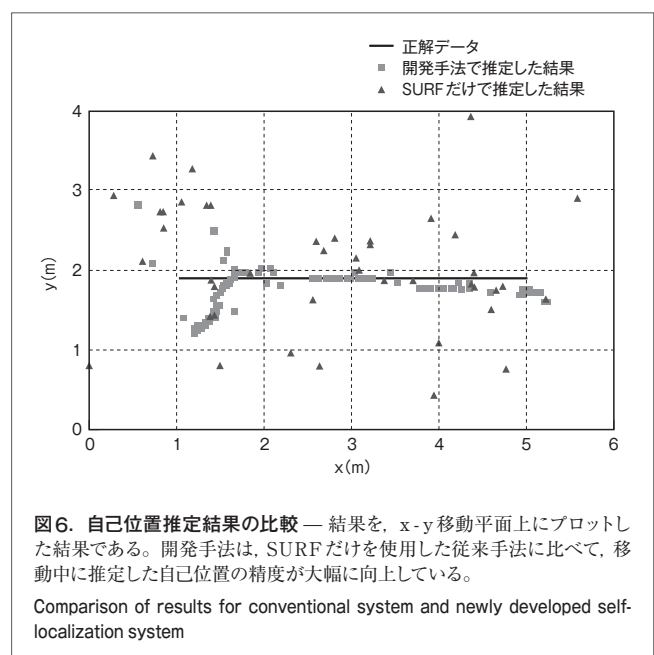


図6. 自己位置推定結果の比較 — 結果を, x-y移動平面上にプロットした結果である。開発手法は, SURFだけを使用した従来手法に比べて, 移動中に推定した自己位置の精度が大幅に向上している。

Comparison of results for conventional system and newly developed self-localization system

車輪回転量の積算誤差などにより内部に保有する自己位置と実際位置の乖離が徐々に大きくなり、やがて行動不能になった。一方、この手法により自己位置を補正しながら移動をさせた場合には、位置誤差の累積がなくなり、ロボットは安定して移動を継続できるようになった。

6 あとがき

人共存環境で活動するためのロボット移動システムで重要な経路生成、衝突回避、及び自己位置推定について、実時間で動作し、かつ環境へ柔軟に対応できる技術を開発し、その高い有効性を実験により確認した。今後は、混雑度が高く動きの激しい場所など、より現実に近い環境への適応を進め、実用化に向けて応用範囲を広げていく。

なお、この研究の一部は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業「戦略的先端ロボット要素技術開発」プロジェクト (ロボット搬送システム) の一環として行われた。

文献

- (1) Yoshimi, T., et al. "Development of a Person Following Robot with Vision Based Target Detection". Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 2006-10, IEEE and RSJ. p.5286 - 5291.
- (2) Rimon, E., et al. Exact robot navigation using artificial potential functions. IEEE Trans. on Robotics & Automation. 8, 5, 1992, p.501 - 518.
- (3) Yagi, Y., et al. "Panorama Scene Analysis with Conic Projection". In Proceedings IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '90. Tsuchiura, 1990-07, IEEE and RSJ. p.181 - 187.
- (4) Lowe, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. Int. Journal of Computer Vision. 60, 2, 2004, p.91 - 110.
- (5) Bay, H., et al. "Surf: Speed up robust features". In The ninth European Conference on Computer Vision. Graz, Austria, 2006-05, TUG and University of Ljubljana. p.404 - 417.



園浦 隆史 SONOURA Takafumi

研究開発センター 機械・システムラボラトリー。
ロボット制御技術の研究・開発に従事。
計測自動制御学会, 日本ロボット学会会員。
Mechanical Systems Lab.



十倉 征司 TOKURA Seiji, D. Eng.

研究開発センター ヒューマンセントリックラボラトリー,
博士 (工学)。ロボットシステム構築の研究・開発に従事。
計測自動制御学会, 日本ロボット学会会員。
Human Centric Lab.



田崎 豪 TASAKI Tsuyoshi

研究開発センター ヒューマンセントリックラボラトリー。
ロボットセンシングの研究・開発に従事。
日本ロボット学会会員。
Human Centric Lab.